CANMET

TECHNIQUES DE LOCALISATION DES FOYERS FONDÉES SUR L'ARRIVÉE DES ONDES P

SP 86-15F

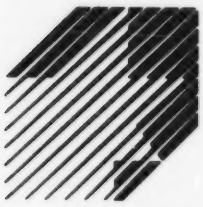
88-03381/

TECHNIQUES DE LOCALISATION DES FOYERS FONDÉES SUR L'ARRIVÉE DES ONDES P

J. Niewiadomski

Laboratoire d'Elliot Lake
Laboratoires de recherche minière

PRIX D'EXCELLENCE DU CANADA 1986



22 pp

Publication spéciale du CANMET
SP 86-15F

MICROMEDIA

PALME D'ARGENT EN TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-15-86-15F
ISBN 0-660-92282-7

au Canada: $3.75
à l'étranger: $4.50

Prix sujet à changement sans préavis

Avant-propos

Le projet Canada-Ontario-Industries sur les coups de toit a été entrepris grâce à un "mémoire d'entente" qui a été signé en septembre 1985. Ce projet a pour but de développer une expertise canadienne accrue dans les domaines du contrôle, de l'analyse et de la prévention des coups de toit. Pour atteindre cet objectif, une équipe de spécialistes a été rassemblée au Laboratoire d'Elliot Lake des Laboratoires de recherche minière. Cette équipe sera au service de l'industrie pour répondre à leurs besoins à travers le pays.

Le présent rapport est un des premiers comptes rendus du projet. Dans le but de promouvoir un transfert de technologie, ce rapport ainsi que ceux qui suivront seront publiés dans un format qui encouragera la plus vaste distribution possible.

John E. Udd
Directeur
Laboratoires de recherche minière

Foreword

The Canada – Ontario – Industry Rockburst Project was initiated through a "Memorandum of Understanding" signed in September, 1985. The goals of the project are to develop improved Canadian capabilities in rockburst monitoring, analysis, and prevention. To accomplish these, a team of specialists is being assembled at the Mining Research Laboratories facilities at Elliot Lake, Ontario. The team will be available on a national basis to serve industry needs.

This report is one of the first outputs of the project. In the interests of technology transfer, it, and subsequent reports, will be published in a format which will encourage the broadest possible distribution.

John E. Udd
Director
Mining Research Laboratories

TECHNIQUES DE LOCALISATION DES FOYERS FONDÉES SUR L'ARRIVÉE DES ONDES P

*J. Niewiadomski**

Résumé

Le présent rapport est une courte description des quatre techniques de localisation des foyers utilisées dans des mines de l'Ontario. Les deux méthodes linéaires (méthode des moindres carrés et méthode USBM-ISA) font l'objet d'une interprétation géométrique simple qui peut être utilisée pour évaluer rapidement le conditionnement du système linéaire d'équations créé par ces méthodes.

En ce qui concerne les méthodes non linéaires directes (méthode du simplexe et méthode des blocs), on en présente les fonctions objectives résultantes.

Mots-clés: Séismologie; techniques de localisation.

* *Scientifique invité, Laboratoire d'Elliot Lake, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Elliot Lake (Ontario) provenant de l'Institut de géophysique de l'Académie polonaise des sciences, Varsovie, Pologne.*

SOURCE-LOCATION TECHNIQUES USING P-WAVE ARRIVALS

*J. Niewiadomski**

Abstract

This report presents a short description of four location techniques used in Ontario mines. For the two linear methods (Least Square and USBM-ISA), a simple geometrical interpretation is given which may be used as a tool for fast evaluation of the conditioning of the linear system of equations created by these methods.

For the direct, non-linear methods (Simplex and Block method) the forms of the objective functions are presented.

Keywords: Seismology; Location techniques.

**Visiting Fellow, Elliot Lake Laboratory, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Elliot Lake Ontario, from the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland.*

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	i
Foreword	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Introduction	1
Méthode des moindres carrés	1
Méthode USBM-ISA	3
Méthode des blocs et méthode du simplexe	5
Bibliographie	7

FIGURES

1. La fonction objective F(X,Y,Z = 800), (Éq. 9) 11
2. La fonction objective F(X,Y,Z = 500), (Éq. 9) 12
3. Les isolignes de la fonction objective de la figure 1 13
4. Les isolignes de la fonction objective de la figure 2 14

INTRODUCTION

En Ontario, onze mines exploitent des réseaux microsismiques qui sont tous composés d'un système Electrolab MP-250 dont le nombre de canaux varie de 16 à 64 et dont les capteurs sont soit des vélocimètres, soit des accéléromètres.

Les données de sortie de l'Electrolab MP-250 fondées sur l'arrivée des ondes P sont utilisées pour calculer les coordonnées du foyer. Dans la majorité des cas, ce calcul est effectué par la méthode des moindres carrés avec comme valeur inconnue la vitesse. Les géophones sont habituellement utilisés par groupe de six. Dans quelques mines, on utilise la méthode des moindres carrés, la méthode des blocs et la méthode graphique pour traiter les données provenant de plus de six géophones.

Le présent rapport porte sur les quatre techniques de localisation des foyers:

- la méthode des moindres carrés (USBM);
- la technique de localisation des foyers mise au point pour la mine Mount Isa (USBM -ISA);
- la méthode des blocs; et
- la méthode du simplexe.

LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS

Cette méthode a été présentée par Blake et coll. (1) qui ont élaboré un système d'équations algébriques linéaires dont les valeurs inconnues sont les trois coordonnées du foyer (ou aussi la vitesse). Pour ce faire, ils ont eu recours à des opérations mathématiques simples portant sur la série des équations de base. L'équation de base du i-ième géophone peut être formulée de la façon suivante:

$$d_i = [(X - a_i)^2 + (Y - b_i)^2 + (Z - c_i)^2]^{1/2} = V_i t_i \qquad \text{Éq. 1}$$

où

d_i est la distance mesurée entre le foyer sismique et le i-ième géophone;
X, Y et Z sont les coordonnées du foyer;
a_i, b_i et c_i ($i = 1,2,...$) sont les coordonnées des géophones;
V_i est la vitesse de l'onde sismique;
t_i est le temps de déplacement de l'impulsion entre le foyer sismique et le i-ième géophone.

Un système d'équations algébriques linéaires obtenu à partir de Blake et coll. (1) peut prendre la forme suivante:

$$a_{i1}X + a_{i2}Y + a_{i3} = b_i \qquad \text{Éq. 2}$$

ou $a_{i1}X + a_{i2}Y + a_{i3}Z + a_{i4}V = b_i$; $i = 1,2,...,n$

Les coefficients a_i et b_i sont composés des temps d'arrivée enregistrés et des coordonnées du géophone et le membre droit des deux équations (avec ou sans vitesse) est différent. Pour résoudre l'équation 2, si la vitesse est connue, il faut au moins cinq géophones, et si la vitesse est inconnue, il en faut au moins six.

On peut résoudre l'équation 2 par différentes méthodes. La méthode choisie doit être une méthode stable étant donné que le problème à résoudre est inverse et qu'en général, dans tous les problèmes inverses, des erreurs sont très susceptibles de se glisser dans les données d'entrée et au cours des calculs, par exemple lorsque les données sont arrondies ou tronquées informatiquement ou lorsque les ondes P ne sont pas interprétées comme telles. Pour diminuer les erreurs de localisation des foyers, les auteurs de ces méthodes présentées dans le bulletin de l'USBM ont décidé d'utiliser la méthode des moindres carrés. Cette méthode, si elle est utilisée lorsque le nombre d'équations est égal au nombre des inconnues, est parfois appelée la "méthode de solution directe"; cependant, d'un point de vue mathématique, il n'y a pas de différence entre la méthode directe et la méthode des moindres carrés. Dans les deux cas, on obtient un système final d'équations linéaires en multipliant les deux membres de l'équation par la matrice de base transposée. Pour expliquer ce qui précède, rédigeons le système de base de l'équation 2 sous forme de matrice:

$$\underset{(n,m)}{A} \cdot \underset{(m,1)}{\overline{X}} = \underset{(n,1)}{\overline{Y}}; \quad \overline{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \text{ou aussi } V \end{bmatrix}, \overline{Y} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \text{ou aussi } b_4 \end{bmatrix} \qquad \text{Éq. 3}$$

où

$\underline{A}$ est la matrice du système (Éq. 2),
$\overline{Y}$ est le vecteur du côté droit, et
$\overline{X}$ est le vecteur que l'on cherche.

Entre parenthèses sont indiquées les dimensions des matrices et des vecteurs appropriés (nombre de lignes et nombre de colonnes). Les vecteurs X et Y sont simplement des matrices-colonnes. Si les deux membres de l'équation 3 sont prémultipliés par la transposée de la matrice A, A^T, on obtient alors pour $n = m$ ("direct") ou $n > m$ ("moindre carré") le système d'équations dont la matrice principale du système est carrée (et également symétrique) et dont les dimensions sont égales au nombre des inconnues, m:

$$\underset{(m,m)}{(A^TA)} \cdot \underset{(m,1)}{\overline{X}} = \underset{(m,1)}{\overline{Y}} \qquad \text{Éq. 4}$$

Dans le cas des problèmes inverses, la matrice A est généralement faiblement conditionnée. Le conditionnement de la matrice peut être vérifié en calculant les valeurs singulières de la matrice A. Si le rapport de la valeur singulière la plus élevée à la valeur la plus faible est supérieure à un certain nombre N (habituellement $N = 5 \div 10$), la matrice est alors mal conditionnée.

Lorsqu'on résoud un tel système d'équations linéaires, tout changement même minime dans les données d'entrée peut produire des erreurs majeures dans la solution, qui résulte de l'instabilité du système ou, en d'autres termes, d'un mauvais conditionnement de la matrice A. Pour vérifier le conditionnement de la matrice, on peut utiliser l'interprétation géométrique du système d'équations linéaires qui donne une indication qualitative du conditionnement de la matrice et la possibilité de comparer les deux systèmes d'équation. Pour expliquer ce qui précède, prenons, par exemple, le système suivant:

$$\begin{bmatrix} S_{11}, S_{12}, \ldots, S_{1m} \\ S_{21}, S_{22}, \ldots, S_{2m} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_{m1}, \ldots\ldots, S_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \\ \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \\ \\ Y_m \end{bmatrix} \qquad \text{Éq. 5}$$

Chacune des lignes de la matrice de l'équation 5 peut être traitée comme une série de paramètres décrivant un hyperplan représentatif dans un espace de dimensions m (dans un espace à trois dimensions, ils sont simplement appelés des "plans"). Le système 5 est supposément stable, non vulnérable aux erreurs, si les angles d'inclinaison des plans les uns par rapport aux autres ne sont pas trop petits.

Si les hyperplans sont quasi parallèles, le système est évidemment instable. (Dans le cas d'un espace à deux dimensions, on peut utiliser la même interprétation pour décrire le système à deux équations. Au lieu d'hyperplans, on aura deux lignes droites.) On peut calculer les angles α_{ik} entre les hyperplans "i" et "k" en fonction de leur cosinus:

$$\cos(\alpha_{ik}) = \frac{\sum_{j=1}^{m} S_{ij} * S_{kj}}{\left(\sum_{j=1}^{m} S_{ij}^2 * \sum_{j=1}^{m} S_{kj}^2 \right)^{1/2}} \qquad \text{Éq. 6}$$

Pour les besoins de l'illustration, considérons six géophones de coordonnées X, Y et Z:

N°	X	Y	Z
1	(0,	0,	0)
2	(0,	0,	1000)
3	(1000,	0,	0)
4	(1000,	0,	1000)
5	(0,	1000,	0)
6	(0,	1000,	1000)

Si l'on suppose que la vitesse qui est utilisée pour calculer les temps d'arrivée est v = 6000 m/s et que les coordonnées d'un foyer sismique se trouvant à l'intérieur d'un réseau de géophones sont X = 300, Y = 400, Z = 800, la matrice finale produite par un programme des moindres carrés (transposée de la matrice originale multipliée par la matrice originale) sera la suivante:

(1): 2,98 E−01, −6,59 E−01, −6,39 E−02, 2,15 E−08,
(2): −6,59 E−01, 3,00 E−00, 9,65 E−01, −1,21 E−07,
(3): −6,39 E−02, 9,65 E−01, 3,82 E−01, −3,74 E−08,
(4): 2,15 E−08, −1,21 E−07, −3,74 E−08, 4,55 E−15.

Les angles d'intersection des différents hyperplans (indiqués entre parenthèses) sont les suivants:

pour (1 et 2): l'angle est de 16,75°,
pour (1 et 3): l'angle est de 25,78°,
pour (1 et 4): l'angle est de 18,33°,
pour (2 et 3): l'angle est de 9,03°.

Si le foyer sismique est situé à l'extérieur du réseau des géophones et que ses coordonnées sont X = 3 000, Y = 4 000, Z = 8 000, la matrice ainsi que les angles seront alors modifiés. La matrice prendra la forme suivante:

(1): 2,20 E−00, −1,96 E−00, 1,92 E−01, −4,19 E−08,
(2): −1,96 E−00, 1,77 E−00, −1,87 E−01, 3,73 E−08,
(3): 1,92 E−01, −1,87 E−01, 2,47 E−02, −3,73 E−09,
(4): −4,19 E−08, 3,73 E−08, −3,73 E−09, 7,99 E−16.

Les angles entre les hyperplans en question seront:

pour (1 et 2): l'angle est de 0,55°,
pour (1 et 3): l'angle est de 3,02°,
pour (1 et 4): l'angle est de 0,04°,
pour (2 et 3): l'angle est de 2,30°.

Dans ce cas, les angles sont plus petits, étant donné que le foyer sismique est situé à l'extérieur du réseau des géophones. Il est intéressant de noter que les éléments de la matrice semblent avoir été très peu modifiés. Cependant, l'importance de ces modifications ne peut être déterminée qu'en comparant les changements d'angle entre les plans. Cette méthode simplifiée d'évaluation de la matrice en ce qui concerne le problème de localisation du foyer permet d'évaluer dans quelle mesure la localisation du foyer peut faire l'objet d'erreurs. Comme on peut le constater à partir des exemples ci-dessus, la méthode des moindres carrés donne des résultats raisonnablement fiables pour localiser les foyers situés à l'intérieur du réseau mais qu'elle l'est moins pour les foyers situés à l'extérieur du réseau des géophones.

MÉTHODE USBM-ISA

Cette méthode a été mise au point pour localiser les foyers qui pourraient être situés dans un gisement tabulaire ou à proximité d'un tel gisement. Cette méthode est décrite en détail dans Godson et coll. (3).

L'algorithme de localisation du foyer est fondé sur la méthode des moindres carrés USBM légèrement modifiée. D'abord, les deux premières impulsions enregistrées ne sont plus traitées comme données de base. Deuxièmement, les équations ne sont pas normalisées comme dans l'algorithme USBM. La vitesse est présumée connue et constante. Les auteurs ont introduit une nouvelle variable, T_o, qui est le temps de déplacement de l'onde à partir du foyer jusqu'au premier géophone; cette valeur est traitée comme une inconnue supplémentaire.

Le système de base des équations algébriques linéaires peut donc être formulé de la façon suivante:

$$a_{i1} X + a_{i2} Y + a_{i3} Z + a_{i4} T_0 = b_i ; i = 2,3,...,n \qquad \text{Éq. 7}$$

où

$$a_{i1} = 2 \cdot (a_i - a_{i-1})$$
$$a_{i2} = 2 \cdot (b_i - b_{i-1})$$
$$a_{i3} = 2 \cdot (c_i - c_{i-1})$$
$$a_{i4} = 2 \cdot (t_i - t_{i-1}) * V^2$$
$$b_i = (a_i^2 - a_{i-1}^2) + (b_i^2 - b_{i-1}^2) + (c_i^2 - c_{i-1}^2) - V^2 \cdot (t_i^2 - t_{i-1}^2)$$

Dans les formules précédentes, a_i, b_i et c_i représentaient les coordonnées du géophone, t_i était le temps de déplacement de l'onde à partir du foyer jusqu'au i-ième géophone dont on a retranché t_o. Le système de l'équation algébrique linéaire 7 peut être résolu selon différentes méthodes, notamment par la méthode des moindres carrés telle que recommandée par les auteurs.

Cette méthode donne de meilleurs résultats que la méthode des moindres carrés USBM lorsqu'il faut traiter des événements se produisant à l'extérieur du réseau des géophones, en particulier lorsque la disposition des géophones utilisés pour localiser le foyer n'est pas appropriée. De plus, la variable T_o est introduite pour compenser en partie les erreurs possibles d'enregistrement des temps d'arrivée.

Afin de comparer l'efficacité de cette méthode et de celle des moindres carrés, prenons les deux emplacements de foyer utilisés précédemment, dont l'un, situé à l'intérieur du réseau des géophones, a pour coordonnées X = 300, Y = 400, et Z = 800.

La matrice finale de ce système qui est le produit de la matrice décrite directement par l'équation 7, prémultipliée par la transposée de cette même matrice est (en ce qui concerne le foyer situé à l'intérieur du réseau) la suivante:

$$\begin{array}{llll} (1): & 1{,}2\ E+07, & -8{,}0\ E+06, & 4{,}0\ E+06, \quad 8{,}8\ E+09, \\ (2): & -8{,}0\ E+06, & 1{,}6\ E+07, & 0{,}0\ E+00, \quad 3{,}2\ E+09, \\ (3): & 4{,}0\ E+06, & 0{,}0\ E+00, & 4{,}0\ E+06, \quad -9{,}0\ E+09, \\ (4): & -8{,}8\ E+09, & 3{,}2\ E+09, & -9{,}0\ E+09, \quad 1{,}2\ E+14. \end{array} \qquad \text{Éq. 8}$$

qui donne la série d'angles suivante entre les hyperplans:

pour (1 et 2): l'angle est de 0,40°,
pour (1 et 3): l'angle est de 0,04°,
pour (1 et 4): l'angle est de 0,09°,
pour (2 et 3): l'angle est de 0,22°,
pour (2 et 4): l'angle est de 0,32°,
pour (3 et 4): l'angle est de −0,05°.

Comme les angles sont très petits, il n'est pas recommandé d'utiliser directement ce système pour localiser le foyer. Le système doit d'abord être "mis à l'échelle". Lorsqu'on analyse la matrice (Éq. 8), on peut constater que les éléments de la dernière colonne et de la dernière ligne sont grands comparativement au reste des éléments de la matrice. Cette inégalité est attribuable aux éléments a(i,4) de la matrice originale du système où les multiplicateurs sont v*v. Si, dans la matrice originale, décrite dans l'équation 7, on utilisait v plutôt que v*v, on aurait alors un système d'équations conçu en fonction de T_o * v, au lieu de l'inconnue T_o. Cette modification permettra d'améliorer sensiblement le conditionnement de la matrice.

Dans leur forme finale, après avoir été améliorés par la mise à l'échelle, les éléments de la matrice se présentent ainsi:

$$\begin{array}{llll} (1): & 1{,}2\ E+07, & -8{,}0\ E+06, & 4{,}0\ E+06, \quad 4{,}4\ E+05, \\ (2): & -8{,}0\ E+06, & 1{,}6\ E+07, & 0{,}0\ E+00, \quad 1{,}6\ E+05, \\ (3): & 4{,}0\ E+06, & 0{,}0\ E+00, & 4{,}0\ E+06, \quad -4{,}5\ E+05, \\ (4): & -8{,}8\ E+09, & 3{,}2\ E+09, & -9{,}0\ E+09, \quad 1{,}2\ E+09. \end{array}$$

Une fois de plus, cette matrice peut être considérée comme une série d'hyperplans dont les angles d'intersection sont plus grands comparativement à ceux de la matrice qui n'a pas subi de mise à l'échelle:

pour (1 et 2): l'angle est de 33,21°,
pour (1 et 3): l'angle est de 41,35°,
pour (1 et 4): l'angle est de 77,59°,
pour (2 et 3): l'angle est de 71,35°,
pour (2 et 4): l'angle est de 85,97°,
pour (3 et 4): l'angle est de 87,38°.

Si l'on calcule maintenant, toujours avec mise à l'échelle, les mêmes angles mais que le foyer sismique se trouve à l'extérieur du réseau des géophones (X = 3 000, Y = 4 000, Z = 8 000), la matrice finale sera:

(1): 1,6 E+07, −8,0 E+06 0,0 E+00, −1,3 E+06,
(2): −8,0 E+06, 1,2 E+07, −4,0 E+06, 8,9 E+05,
(3): 0,0 E+00, −4,0 E+06, 4,0 E+06, −1,8 E+06,
(4): −1,3 E+06, 8,9 E+05, −1,8 E+06, 1,6 E+06.

et les angles d'intersection des hyperplans seront:

pour (1 et 2): l'angle est de 33,07°,
pour (1 et 3): l'angle est de 71,19°,
pour (1 et 4): l'angle est de 53,75°,
pour (2 et 3): l'angle est de 42,48°,
pour (2 et 4): l'angle est de 46,13°,
pour (3 et 4): l'angle est de 37,11°.

En comparant les angles de ces deux emplacements de foyer, on constate que la matrice du foyer situé à l'extérieur du réseau des géophones est très peu modifiée lorsqu'on utilise la méthode USBM-ISA avec mise à l'échelle, c'est-à-dire beaucoup moins que lorsqu'on utilise la méthode des moindres carrés.

Ces deux méthodes possèdent une caractéristique commune très utile: l'emplacement du foyer est considéré comme un problème linéaire ce qui permet l'utilisation de méthodes algébriques linéaires. De plus, les opérations algébriques (notamment l'élévation au carré et la soustraction) intervenant dans la dérivation du système linéaire de l'équation utilisée pour localiser le foyer accentuent l'influence des erreurs contenues dans les données d'entrée, créant souvent un système d'équations très instable.

LA MÉTHODE DES BLOCS ET LA MÉTHODE DU SIMPLEXE

La méthode des blocs et la méthode du simplexe sont différentes des deux premières en ce qu'elles recherchent la valeur minimale d'une fonction non linéaire, que l'on appelle en théorie d'optimisation, fonction objective. Cette fonction, aux fins de la localisation des foyers, peut facilement être générée à partir des relevés des temps d'arrivée enregistrés par les géophones du réseau. Si l'on considère t_i le temps d'arrivée enregistré au i-ième géophone, a_i, b_i et c_i, les coordonnées du i-ième géophone, X, Y et Z les coordonnées du point d'essai et F(X,Y,Z) la fonction objective, on aura:

$$F(X,Y,Z) = \sum_{i=1}^{n} (t_i - t_1) - (t_i^c - t_1^c)^2 \qquad \text{Éq. 9}$$

où

$$t_i^c = [(X-a_i)^2 + (Y-b_i)^2 + (Z-c_i)^2]^{1/2}/V_i$$

et V_i est la vitesse moyenne de l'onde entre le foyer et le i-ième géophone. Pour calculer la fonction objective en utilisant l'équation 9, il faut au moins quatre géophones.

Dans la méthode des blocs, le programme calcule la valeur de la fonction objective aux sommets d'un cube et au centre de ses côtés autour d'un point donné X, Y et Z. À l'étape suivante, le cube est transféré à l'emplacement suivant où la fonction objective est plus petite. Les dimensions du cube peuvent être modifiées mais pas la forme. Dans le cas d'un creux très étroit créé par la fonction objective, certaines difficultés peuvent se présenter en particulier lorsque les dimensions du cube sont trop grandes comparativement à la surface occupée par la valeur minimale de la fonction objective. On peut résoudre ce problème en utilisant un simplexe plutôt qu'un cube comme dans la méthode du simplexe. La forme du simplexe s'adapte automatiquement à la forme des creux de la fonction objective. Le principal avantage de la méthode du simplexe réside donc dans la souplesse du simplexe. Dans les deux cas, la fonction objective peut être décrite par l'équation 9 ou peut être établie en introduisant une autre variable T_o (voir la méthode USBM-ISA).

On peut donc formuler la fonction objective de remplacement par l'équation suivante:

$$F(X,Y,Z) = \sum_{i=1}^{n} (t_i - t_1 + T_0) - \sqrt{(X-a_i)^2 + (Y-b_i)^2 + (Z-c_i)^2 / V_i}^{\,2} \qquad \text{Éq. 10}$$

où

t_i est le temps d'arrivée au i-ième géophone;
V_i est la vitesse moyenne entre le foyer et le i-ième géophone;
T_o est le temps nécessaire au signal pour se rendre du foyer au premier géophone.

Cette valeur, inconnue au début du calcul, peut être incluse dans l'algorithme comme une inconnue vraie faisant augmenter le nombre d'inconnues à quatre. On peut également supposer qu'elle est au départ égale à zéro avant de l'incrémenter et de l'utiliser pour indiquer la valeur minimale de la fonction objective. En procédant de cette façon, la localisation du foyer prend plus de temps mais trois géophones suffisent en général pour déterminer le foyer. Les coordonnées du foyer sont calculées en même temps que le paramètre T_o. Dans les deux cas, on peut corriger la vitesse en comparant les temps d'arrivée calculés et mesurés.

Quelques fonctions objectives sont illustrées dans les figures 1 et 2. Pour bien représenter cette fonction, il faut un espace à quatre dimensions: les coordonnées X, Y et Z et la quatrième dimension F (X,Y,Z). Afin d'éviter des complications, on peut conserver l'une des coordonnées comme valeur constante, par exemple Z. De cette façon, il est possible d'utiliser l'espace à trois dimensions: X,Y,F(X,Y).

La figure 3 montre la fonction objective calculée à l'aide de l'équation 9 lorsque les coordonnées X et Y se situent entre 0 et 1 000 et Z = 800 (valeur constante) et lorsque les coordonnées du foyer sismique sont X = 300, Y = 400, Z = 800 (les coordonnées du géophone sont précisées dans les tableaux des figures 1 et 2). Dans cet exemple théorique, les temps d'arrivée sont calculés sans erreur de sorte que la fonction F(X,Y,Z = 800) atteint sa valeur minimale au point de localisation du foyer. La valeur minimale est donc égale à zéro. La projection de cette fonction sur le plan X, Y (isolignes) est présentée sur la figure 3 (les marques sur les axes X et Y sont espacées de 50 unités).

Si on calcule la fonction objective du plan X, Y qui se situe "sous" le foyer (voir figure 2 où Z = 500 et les coordonnées du foyer sont X = 300, Y = 400, Z = 800), la forme de la fonction objective sera alors quelque peu différente et sa valeur minimale n'égalera pas zéro. De plus, elle ne se situera pas verticalement sous le foyer réel tel qu'indiqué sur la figure 4. Cet exemple illustre qu'en situant volontairement la solution à une hauteur donnée (dans le cas présent lorsque la fonction des différentes coordonnées X et Y ont été calculées et que Z a été maintenu constant mais sous le foyer), on peut fausser les coordonnées du foyer. Il s'ensuit que d'après la figure 2a les coordonnées de la valeur minimale de la fonction objective sont X = 150, Y = 250 (les marques sur l'axe des X et Y sur la figure 2a sont espacées de 50 unités), au lieu de X = 300 et Y = 400.

Parmi les algorithmes très utiles de la technique d'optimisation par les simplexes, mentionnons celui donné par Nelder et Mead (4) et celui utilisé dans la méthode des simplexes mise au point par CANMET. Gendzwill et Prugger (2) décrivent d'autres applications possibles de la méthode des simplexes pour ce qui est de la localisation des foyers.

Les méthodes des blocs et du simplexe sont des méthodes itératives du fait qu'elles visent à déterminer la valeur minimale des fonctions non linéaires. La théorie d'optimisation permet d'utiliser de nombreuses méthodes différentes pour déterminer la valeur minimale de telles fonctions. Elles sont bien connues et des codes FORTRAN ont été mis au point pour les appliquer. Si les données entrées dans l'ordinateur ne sont pas exactes, on ne peut pas s'attendre à obtenir des localisations précises même en utilisant un algorithme mathématiquement exact. Si les données d'entrée sont erronées, comme cela se produit parfois, la méthode statistique appropriée peut permettre d'y remédier. Toutefois, dans la plupart des localisations de foyer, la quantité de données est trop limitée pour recourir de façon efficace à des méthodes statistiques.

BIBLIOGRAPHIE

1. Blake, W., Leighton, F. et Duvall, W.I. "Microseismic techniques for monitoring the behaviour of rock structures"; *Bulletin 665*; U.S. Bureau of Mines; 1974.
2. Gendzwill, D. et Prugger, A. "Algorithms for micro-earthquake locations"; *Compte rendu, 4e Conf. Acoustic Emission/Microseismic Activity*; Penn State University; 1978.
3. Godson, R.A., Bridges, M.C. et McKavanagh, M. "A 32-channel rock noise source location system"; *Compte rendu, 2e Conf. Acoustic Emission/Microseismic Activity*; Penn State University; 1978.
4. Nelder, J.A. et Mead, R. "A simplex method for function minimization"; *Computer Journal* 7:308-313; 1965.

FIGURES

I	XG	YG	ZG	V(AVANT)	V(APRÈS)	T(RÉEL)
1	0.	0.	1000.	20000.	20000.	0,00000
2	0.	1000.	1000.	20000.	20000.	0,00808
3	1000.	0.	1000.	20000.	20000.	0,01461
4	0.	0.	0.	20000.	20000.	0,02024
5	0.	1000.	0.	20000.	20000.	0,02528
6	1000.	0.	0.	20000.	20000.	0,02986

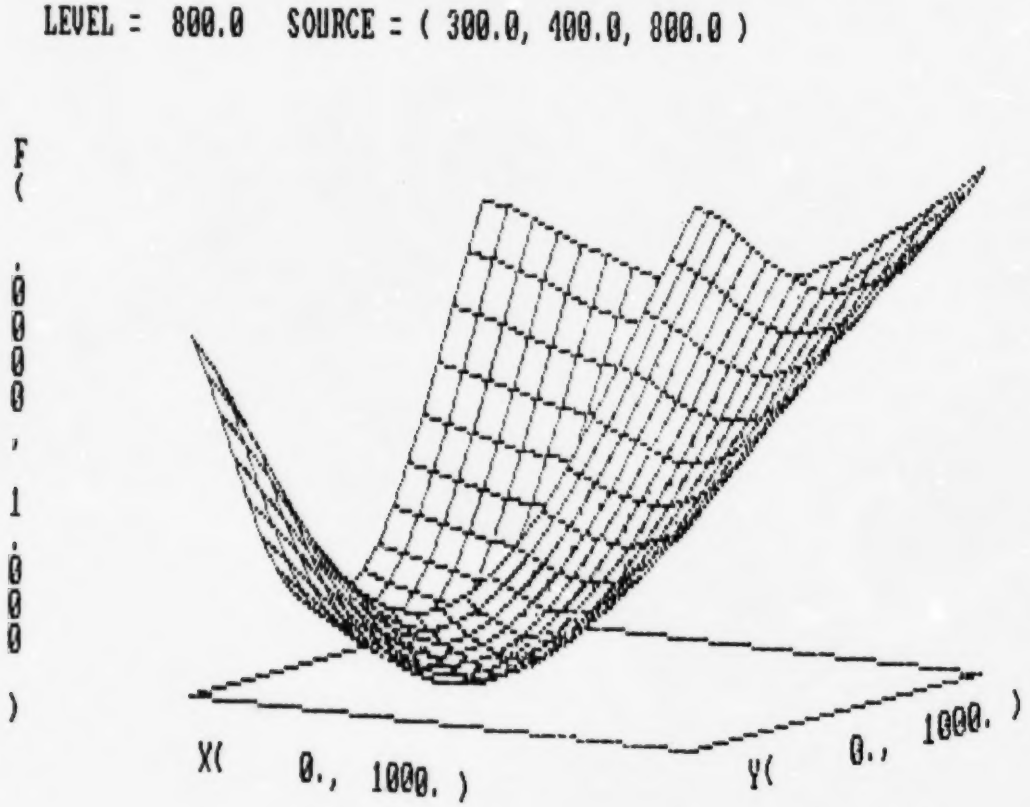


Fig. 1 – Fonction objective F(X,Y,Z = 800), (Eq. 9)

I	XG	YG	ZG	V(AVANT)	V(APRÈS)	T(RÉEL)
1	0,	0,	1000,	20000,	20000,	0,00000
2	0,	1000,	1000,	20000,	20000,	0,00808
3	1000,	0,	1000,	20000,	20000,	0,01461
4	0,	0,	0,	20000,	20000,	0,02024
5	0,	1000,	0,	20000,	20000,	0,02528
6	1000,	0,	0,	20000,	20000,	0,02986

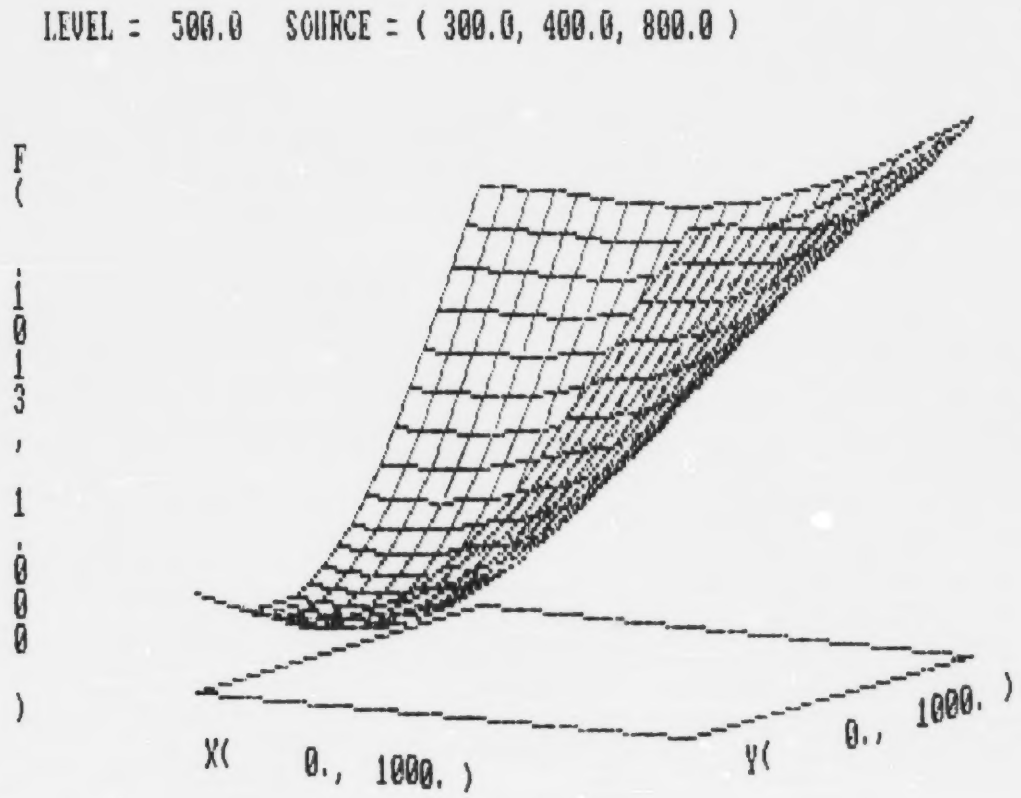


Fig. 2 – Fonction objective F(X,Y,Z = 500), (Éq. 9)

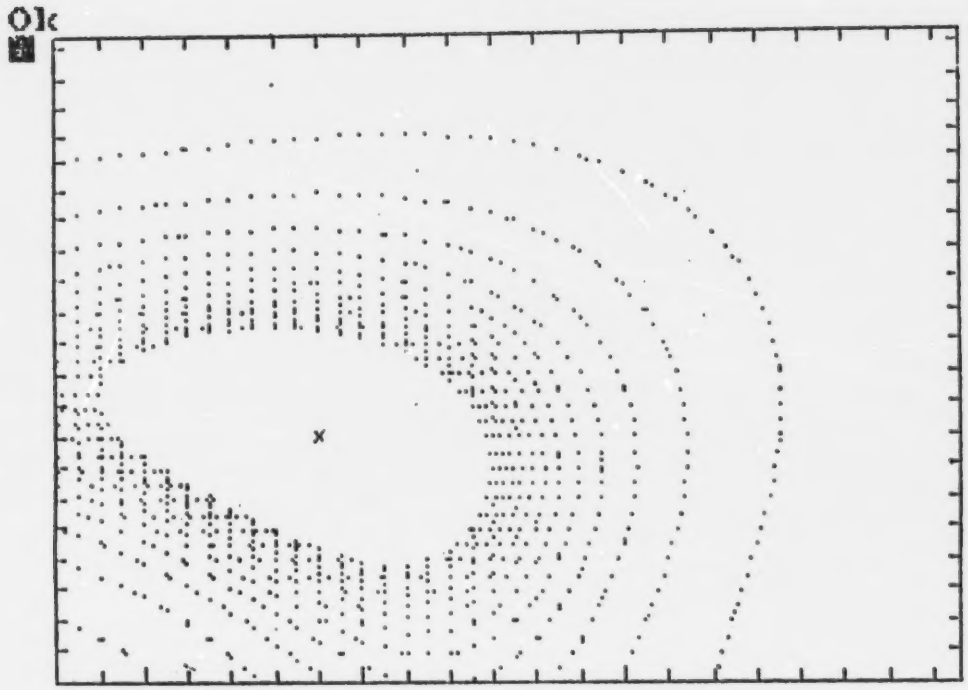


Fig. 3 – Isolignes de la fonction objective de la figure 1

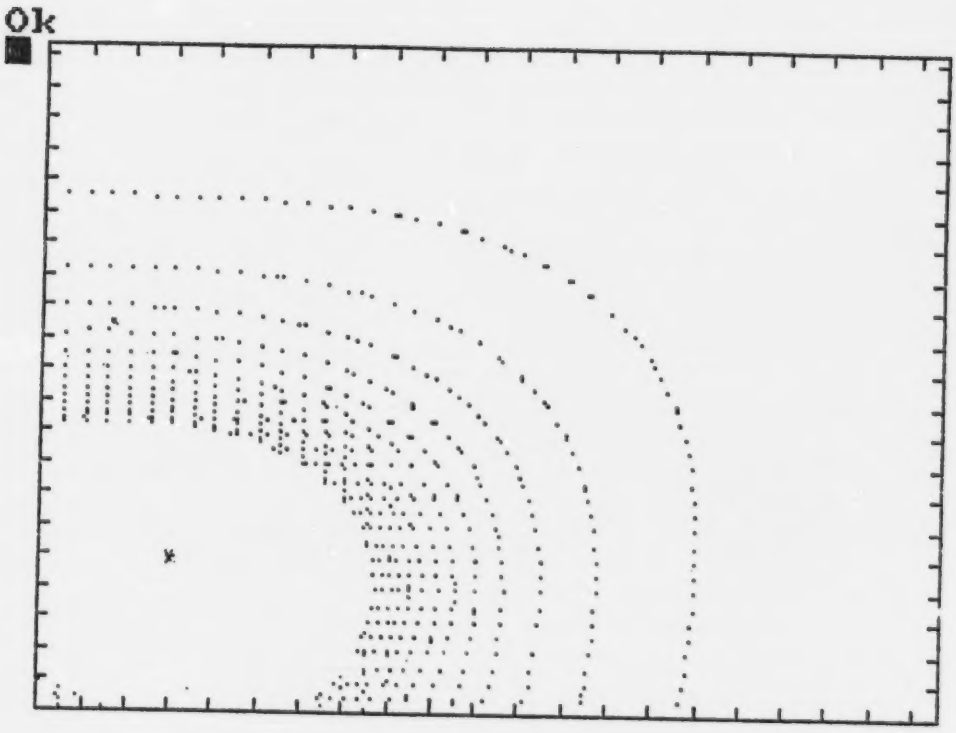


Fig. 4 – Isolignes de la fonction objective de la figure 2

READER SURVEY

CANMET is striving to improve service to you, our readers. Please help us by taking the time to respond to our Reader Survey. Thank you.

SP86 – 15F

Did you find the information in this publication useful?
Very ☐ Somewhat ☐ Not at all ☐

Did you find the information timely ☐ late ☐ ?

Would you prefer to receive CANMET publications in
English ☐ French ☐ both ☐ ?

Which would you prefer: release of CANMET publications simultaneously in both English and French, accepting the delay due to translation; ☐ or, release in the original language as soon as it is available; second language version to follow as soon as possible; ☐

Comments: _____

_____

_____

QUESTIONNAIRE

CANMET désire améliorer son service aux lecteurs; veuillez nous aider en prenant quelques minutes pour répondre à notre questionnaire. Nous apprécions votre collaboration.

SP86 – 15F

Les informations contenues dans cette publication vous ont-elle été utiles?
très ☐ peu ☐ pas du tout ☐

L'information est-elle appropriée? oui ☐ non ☐

Dans quelle langue désirez-vous recevoir les publications de CANMET?
anglais ☐ français ☐ anglais et français ☐

Indiquez votre préférence: Diffusion simultanée des publications de CANMET dans les deux langues officielles en acceptant les délais occasionnés par la traduction; ☐
ou: Diffusion de la publication originale dès que disponible et de la traduction dans un délai raisonnable; ☐

Commentaires: _____

_____